

# Braided 탄소섬유강화 알루미늄 기지 금속복합재료의 제조 및 기계적 특성평가

김경태\* · 이상관\*\* · 홍순형\*

## Fabrication and Mechanical Characterization of Braided Carbon Fiber Reinforced Al Matrix Composites

Kyung-Tae Kim, Sang-Kwan Lee and Soon-Hyung Hong

**Key Words:** Braided carbon fiber Al matrix composites, braided preform, pressure infiltration casting, carbon fiber, aluminum, elastic constant, volume averaging method, RUS.

### Abstract

Braided carbon fiber reinforced Al matrix composites were developed and characterized. Braided carbon fiber preforms with braiding angles of 30°, 45° and 60° were manufactured by using a braiding machine. The manufactured braided carbon fibers were used as reinforcement to fabricate Al matrix composites by employing a pressure infiltration casting method. In the processing of pressure infiltration casting, important processing parameters such as melting temperature, preheating temperature of preform and applied pressure were optimized. Prediction of elastic constants on composites was performed by using the volume averaging method, which utilizes the coordinate transformation and the averaging of stiffness and compliance constants based upon the volume of each reinforcement and matrix material. The elastic moduli of composites were evaluated by using Resonant Ultrasound Spectroscopy(RUS) method and compared with the elastic moduli obtained from static tensile test method.

### 1. 서론

직조형 복합재료(textile composites)는 여러가지 직조법을 통해 제조된 프리폼을 강화재로 하는 복합재료로서, 강화재의 열적, 기계적 특성의 제어가 용이하며, 자동화된 프리폼 제조 기법과 neat-net-shape 제조가 가능하여 우주 항공 및 전자 산업 분야에서 관심의 대상이 되고 있다. 그러나 현재까지 대부분의 직조형 복합재료는 고분자를 기지재료로 하여 활용되고 있어, 강도, 고온 특성 등에서 한계를 나타내고 있다. 이를 해결하기 위한 방안

으로 금속기지 복합재료의 개발이 요구되고 있으나, 제조 공정상의 난점으로 인하여 국내외적으로 제조 사례가 거의 보고되지 않고 있다. 그러나 직조형 금속 복합재료는 직조형 고분자 복합재료와 마찬가지로 생산성이 높고, 복잡한 형상의 부품 성형이 가능하고, 충격 강도가 증가하는 장점 뿐만 아니라 금속 기지가 가지는 장점인 고온 특성, 내충격성, 피로 특성이 향상되는 많은 장점을 가지고 있어 제조 공정만 개발된다면 그 응용 분야를 다양하게 확대할 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 braiding 직조법을 이용하여 braided 프리폼을 제조하고, 가압침투법(pressure infiltration casting)을 이용하여 알루미늄 기지 braided 금속복합재료를 제조하였다. 또한 제조된 금속복합재료의 탄성 계수를 예측하고, 초음파 공명 분광법(Resonant Ultrasonic Spectroscopy)과 인장 시험을 통하여 예측치와 비교하여, 직조형 금속복합

\* 한국과학기술원 재료공학과

\*\* 한국기계연구원 재료공정연구부

재료의 특성평가를 실시한다. 이러한 과정으로부터 본 연구는 직조형 금속복합재료의 응용 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Braided 프리폼의 제조

본 연구에서 사용한 braided 프리폼은 서로 위나 아래로 지나가는 두 종류의 탄소섬유와 종축 방향으로 보강되는 탄소섬유로 이루어져 있다. Fig.1에서는 braided 프리폼을 개략적으로 보여주고 있다. 프리폼은 braiding섬유와 종축섬유의 각도( $\theta$ )에 따라 종류가 결정되는데, 이는 복합재료의 제조시 특성에 큰 영향을 미친다. 또한 braiding과정의 기계적 반복성에 의해 프리폼의 기하학적 형상이 최소 단위 (unit cell) 구조로 특징 지워질 수 있는데, 이 구조의 확인은 braided 프리폼의 기하학적 특성을 구하거나 복합재료의 기계적 특성을 예측하는데 필요하다.

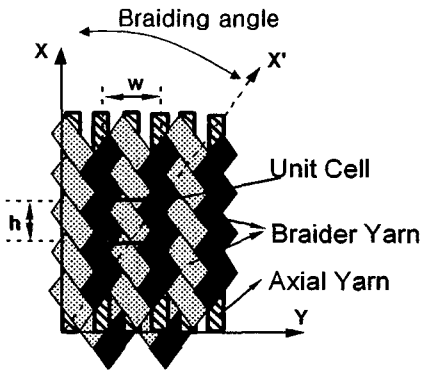


Fig. 1. Braided 프리폼의 구조

며, Fig.1 에서 최소단위 구조를 표시하였다.

Braided 프리폼을 제조하기 위하여 탄소섬유 (T700S, 12K, Toray)를 사용하였으며, 종축 섬유는 16개, braiding 섬유는 32개를 브레이딩 기계에 장착하였다. 튜브형 맨드렐을 프리폼 이송 장치인 캐터필러의 이송속도를 조절하여 braiding각도를 조절하였다. 본 연구에서는 braiding 각도에 따른 기계적 특성을 조사하기 위하여 braiding 각도가 30°, 45°, 60° 인 세 가지 종류의 프리폼을 제조하였다.

### 2.2 금속복합재료의 제조

Braided 탄소섬유가 강화된 알루미늄기지의 금

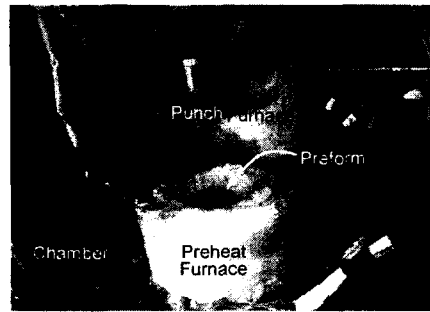


Fig. 2. 가압함침 장비

속복합재료는 가압함침법을 이용하여 제조하였고 가압함침용 장비를 Fig. 2에 나타내었다. 기지재료는 순도 99.9%의 고순도 알루미늄을 사용하였으며 진공챔버내의 분위기는  $10^{-2}$  torr에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 가압함침공정의 변수들로서 알루미늄 용탕의 온도는 800°C로 과열하였고, braided 프리폼의 예열온도는 450°C로 유지하였으며 가압력은 60MPa로 결정하였다. 이 조건으로 제조된 braided 탄소섬유강화 알루미늄기지 금속복합재료와 그 미세 조직을 Fig. 3(a)와 (b)에 나타내었다.

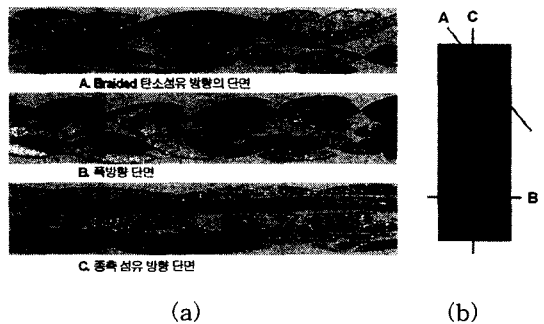


Fig. 3. (a) Braided 탄소섬유 강화 알루미늄기지 금속복합재료의 단면도 (b) 금속복합재료

## 3. 특성예측 및 평가

### 3.1 탄성계수 예측

Braided 금속복합재료의 기계적인 특성은 섬유와 기지재료의 성질과 braiding 구조를 기본으로 한 기하학적 모델로부터 구할 수 있다. 공간상으로 배열된 섬유의 주 방향은 우리가 알고자 하는 좌표방향과 일치하지 않으므로 응력-변형률 관계를 좌표

변환하는 방법이 필요하다.

Braided 섬유는 두께 및 길이방향에 대하여 방향성이 있지만 그 변형특성은 좌표변환을 수행하면 원하는 좌표계로 분해할 수 있다. 이를 통해 braided 섬유의 특별한 형상은 더 이상 문제되지 않고 단지 직교 등방 재료의 여러 층으로 간주될 수 있다. 본 연구에서 제조된 braided 복합재료는 네 가지 요소 즉,  $\theta$  방향의 braided 섬유, 종축 섬유 및 기지재료로 되어 있기 때문에 이 복합재료는 서로 다른 재료가 4개의 층으로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 단위구조를 보면, 이러한 층은 길이 방향으로 배열되어 있고, 하층이 복합재료의 x-방향으로 가해질 때 각 층은 일정 변형률(strain) 상태에 있다고 가정할 수 있다. 따라서, 각 층의 강성상수를 체적에 대하여 평균하면 전체 복합재료의 유효 강성상수를 얻을 수 있다. 복합재료의 유효 강성상수를 역 변환 한 후 단위 셀 부피에 대하여 평균하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{ij} = C_{ij}^a \frac{V_a}{V_t} + C_{ij}^{bp} \frac{V_b}{2V_t} + C_{ij}^{bm} \frac{V_b}{2V_t} + C_m^m (1 - V_y)$$

여기서  $C_{ij}^a$ ,  $C_{ij}^{bp}$ , 및  $C_{ij}^{bm}$  는 종축섬유 및  $\theta$  방향의 브레이드 섬유의 강성이며,  $C_m$  은 기지재료의 [6 x 6]행렬 강성 상수이다. 위 식의 강성상수를 연성상수로 역 변환하면 3축 브레이드 복합재료의 탄성계수 및 프와송 비는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} E_{xx} &= \frac{1}{S_{11}^c}, & E_{yy} &= \frac{1}{S_{22}^c}, & E_{zz} &= \frac{1}{S_{33}^c} \\ G_{yz} &= \frac{1}{S_{44}^c}, & G_{zx} &= \frac{1}{S_{55}^c}, & G_{xy} &= \frac{1}{S_{66}^c} \\ \nu_{xy} &= \frac{-S_{21}^c}{S_{11}^c}, & \nu_{zx} &= \frac{-S_{13}^c}{S_{33}^c}, & \nu_{yz} &= \frac{-S_{32}^c}{S_{22}^c} \end{aligned}$$

Fig. 4는 braided 탄소섬유 강화 알루미늄 기지 금속복합재료의 탄성계수를 체적 평균법을 이용하여 예측한 결과를 나타내었다.

### 3.2 탄성계수의 평가

#### 3.2.1 초음파 분광법을 이용한 탄성계수의 측정

본 연구에서는 braided 탄소섬유강화 알루미늄 금속복합재료의 시편 제조시 물체의 크기가 직경 70mm로 제한되어 있어 제조되는 시편의 크기도 제한을

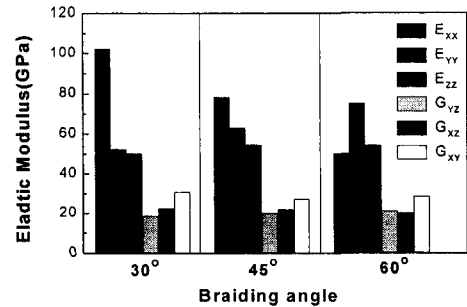


Fig. 4. Braided 탄소섬유 강화 알루미늄기지 금속복합재료의 탄성계수 예측치

받아 인장시험으로는 종축의 한 방향으로만 측정이 가능하다. 따라서 3차원의 모든 방향에 대한 탄성계수 데이터를 얻기 위하여 초음파 공명 분광법(RUS)을 이용하여 탄성계수를 측정하였다. Fig. 5에서 RUS장비의 개략도를 나타내었다. 시편은 braided 탄소섬유 강화 알루미늄 금속복합재료의 최소단위를 고려하여 길이 10mm, 폭 6mm, 높이 2mm의 직육면체 형상으로 가공하였다. 시편의 형상을 Fig. 6(b)에 나타내었다. 시험 방법은 시편이 free vibration을 일어나도록 하기 위해 시편의 대각선 모서리 부분을 RUS장비 위아래 탐촉자 부분에 닿도록 하여 고정시킨 후, drive transducer를 통해 주파수를 올려가며 시편을 진동시켜 receive transducer에서 시편면이 가지는 고유 공명 주파수를 측정하여 시편 크기, 밀도를 통하여 시편의 전 방향 탄성계수 텐서를 계산한다. RUS를 이용하여 측정한 탄성계수와 예측치의 비교 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

#### 3.2.2 인장시험법을 이용한 탄성계수의 측정

국내외적으로 물성치가 거의 제시되지 않은 Braided 탄소섬유가 강화된 금속복합재료의 탄성계수를 평가하기 위해서 인장시편을 제작하였다. Braided 탄소섬유강화 알루미늄기지 금속 복합재료의 인장시편은 기존의 ASTM에서는 찾아볼 수가 없으므로, dog-bone 형태로 폭 9.5mm, 길이 70mm, 두께는2mm로 본 연구에 적합한 시편규격을 새로 결정하였다. 인장 시험시 시편은 10mm크기의 Extensometer를 부착하여 측정하였다. 시험에 사용한 Extensometer는 시편 폭 방향으로 최소 구조 단위를 포함할 만큼 충분히 크므로 하중방향으로

braiding 각도에 대한 탄성계수 차이를 측정할 수 있도록 하였다. 인장 시험은 참고 시편으로 사용할 순알루미늄과 braided탄소섬유강화 알루미늄 금속복합재료에 대하여 수행하였다. 인장시험기로는 Instron4206을 사용하였고, 시험은 0.2mm/min의 cross-head 속도로 상온에서 수행하여 braided 탄소섬유 강화 알루미늄 기지 금속복합재료의 종축 방향 탄성 계수를 측정하였다. 인장시험법으로 측정된 탄성계수와 예측치를 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

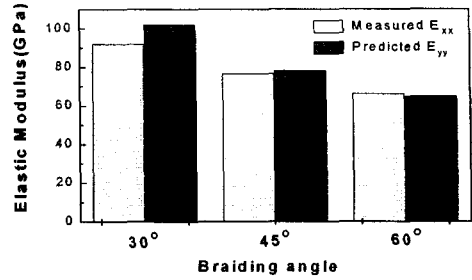
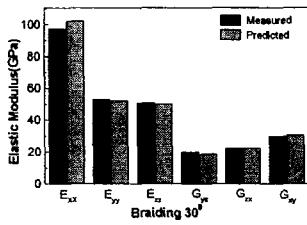
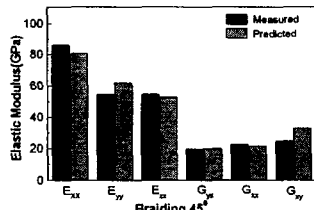


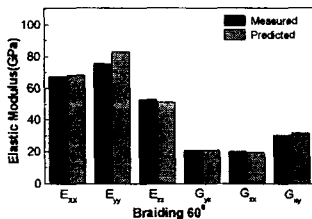
Fig. 7 인장시험으로 구한 탄성계수와 예측치의 비교



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. RUS를 이용한 탄성계수의 측정결과와 체적평균법으로 예측한 결과의 비교 (a) braiding각도 30° (b) braiding각도 45° (c) braiding 각도 60°

#### 4 결론

1. 본 연구에서는 가압침침법을 사용하여 braided 탄소섬유강화 알루미늄기지 금속복합재료를 성공적으로 제조하였고, 그 공정 조건을 용탕온도 800℃, 프리폼의 예열온도 450℃, 가압력 60MPa으로 확립함으로써 제조공정변수를 최적화하였다.

2. 체적 평균법을 이용하여 2차원 브레이드 금속복합재료의 탄성 계수를 예측하였으며, 브레이드 각도가 30°, 45°, 60° 인 금속복합재료의 경우, x, y 및 z 방향의 탄성계수는 초음파 공명분광법을 이용하여 측정된 결과와 일치하였다. 또한, 금속복합재료의 종축 방향에 대한 탄성계수의 예측 결과와 초음파 공명분광법을 통한 금속복합재료의 종축방향 탄성계수 결과는 인장시험법을 통하여 매우 잘 일치함을 검증할 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) J. H. Byun, "The analytical characterization of 2-D braided textile composites", *Comp.Sci. & Tech.* vol.60, p. 705, 2000.
- (2) J. H. Byun, T.W. Chou, *Compressive Composite Materials : Mechanics of Textile Composites*, Vol.1, pp719-761, Elsevier, 2000(2)
- (3) 정현규, 초음파공명 분광법을 이용한 SiCp/Al 금속 복합재료의 동적탄성특성 해석, 한국과학기술원, 박사학위논문, 2000(3)